



بررسی تجربی و شبیه‌سازی شکل‌پذیری ورق آلومینیومی در فرآیند هیدروفرمینگ گرم

محمد حسین پور¹، عبدالحمید گرجی^{2*}، محمد بخشی جویباری³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

* صندوق پستی 47148-71167، hamidgorji@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 مهر 1393

پذیرش: 28 آبان 1393

ارائه در سایت: 06 دی 1393

کلیدواژگان:

آلیاژهای آلومینیوم

هیدروفرمینگ گرم

هیدروفرمینگ با فشار شعاعی

توزیع ضخامت

نیروی سنبه

چکیده

آلیاژهای آلومینیوم دارای نسبت استحکام به وزن بالا و خواص ضد خوردگی مناسبی هستند. قابلیت شکل‌پذیری پایین در دمای اتاق، عیب عمده آن‌ها است. برای رفع این محدودیت، از عملیات شکل‌دهی گرم استفاده می‌شود. یکی از فرآیندهای شکل‌دهی، روش کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی می‌باشد که در حالت گرم تحقیقی بر روی آن گزارش نشده است. در پژوهش حاضر، پس از بررسی امکان شکل‌دهی آلیاژ آلومینیوم 5052 در فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ گرم، به مطالعه اثر فشار سیال، دما و سرعت فرآیند بر روی توزیع ضخامت و نیروی سنبه برای شکل‌دهی قطعه استوانه‌ای با کف تخت پرداخته شد. به منظور انجام تحلیل جامع، شبیه‌سازی فرآیند با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام گرفت. نشان داده شد که نتایج به دست آمده تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی داشته است. مشخص شد که افزایش فشار تا یک مقدار معین، باعث بهبود ضخامت می‌شود و نیروی سنبه افزایش می‌یابد. نیروی مورد نیاز سنبه با افزایش دما کاهش یافت ولی با تغییرات سرعت سنبه ثابت ماند. همچنین افزایش سرعت شکل‌دهی و کاهش دمای فرآیند نازک‌شدگی بیشینه را افزایش می‌دهد. به علاوه، شکل‌دهی ورق در دمای محیط، شرایط گرم غیرهم‌دما و هم‌دما مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که کاهش ضخامت بیشینه در حالت‌های گرم غیر-هم‌دما و دمای محیط، کمتر از گرم هم‌دما بوده ولی نیروی بیشینه سنبه در حالت گرم هم‌دما کمتر می‌باشد.

On the experimental and numerical study of formability of Aluminum sheet in warm hydroforming process

Mohammad Hosseinpour, Abdolhamid Gorji *, Mohammad Bakhshi

Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

* P.O.B. 47148-71167 Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 19 October 2014
Accepted 19 November 2014
Available Online 27 December 2014

Keywords:

Aluminum alloys
warm hydro forming
hydrodynamic by radial pressure
thickness distribution
punch force

ABSTRACT

Aluminum alloys have high strength to weight ratio and suitable corrosion resistance. Poor formability at room temperature is the main drawback of using these alloys. In order to overcome this limitation, the work material is formed at higher temperature. One of the forming processes is hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure on which no relevant research has been reported in warm condition. In the present paper, after examining the formability of 5052 aluminum alloy in warm hydrodynamic deep drawing, the effect of media pressure, temperature and forming speed on thickness distribution and punch force in forming of flat-bottom cylindrical cups was investigated. In order to perform a complete investigation, the simulation of the process was established using ABAQUS software. It was shown that the results were in accordance with the experimental findings. It was also demonstrated that increasing the maximum oil pressure to a specified level could improve the thickness distribution and lead to increasing the punch force. The required punch force was decreased with increase in temperature but remained unchanged by punch speed variation. Additionally, the maximum thickness reduction was decreased with increasing and decreasing of temperature and punch speed, respectively. Moreover, the forming of the sheet at room temperature, isothermal and non-isothermal warm forming processes was compared. It was concluded that the maximum thickness reduction in the formed part was less in the cases of cold forming and non-isothermal warm forming than the isothermal warm forming. But the required forming force is decreased in isothermal warm forming when compared with the other two conditions.

1- مقدمه

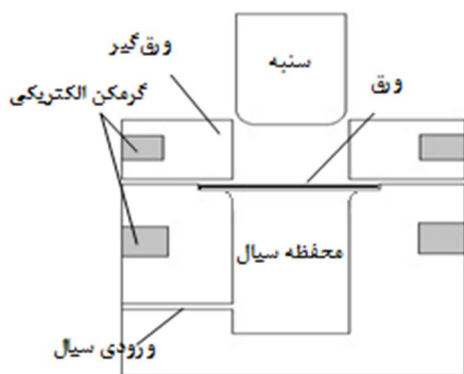
که در آن علاوه بر اعمال نیروی پرس، به طور هم‌زمان از فشار سیال نیز برای عملیات شکل‌دهی استفاده می‌شود [1]. توانایی شکل‌دهی قطعات پیچیده، امکان دستیابی به نسبت کشش بالاتر و در نتیجه کاهش تعداد مراحل

روش‌های متفاوتی برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی وجود دارد که از جمله این روش‌ها می‌توان به هیدروفرمینگ اشاره نمود. هیدروفرمینگ فرآیندی است

Please cite this article using:

M. Hosseinpour, A. Gorji, M. Bakhshi, On the experimental and numerical study of formability of Aluminum sheet in warm hydroforming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 159-168, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 شماتیک مجموعه قالب هیدروفرمینگ گرم

چانگ و همکاران کشش عمیق گرم هم‌دما را برای آلیاژ منیزیمی AZ31 به طور تجربی بررسی کرده‌اند. آنها به این نتیجه رسیدند که در دمای شکل‌دهی کمتر از 150 درجه سانتیگراد در ورق به راحتی ترک ایجاد می‌شود، اما در دمای 150 درجه سانتیگراد و سرعت 15 میلی‌متر بر دقیقه نسبت کشش حدی به 2 می‌رسد و نیز نتیجه گرفتند که از دمای 200 درجه سانتیگراد تا 300 درجه سانتیگراد نسبت کشش حدی می‌تواند به 3 برسد [13].

فرآیند هیدروفرمینگ گرم را از نظر دمای سیستم می‌توان به دو دسته کلی هم‌دما و غیر هم‌دما تقسیم نمود. در فرآیند هم‌دما تمام اجزای قالب، ورق و سیال مورد استفاده در دمای یکسان قرار دارند، در حالی که در حالت غیر هم‌دما اینگونه نیست. تاکنون پژوهشی در زمینه فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی در حالت گرم گزارش نشده است که در این مقاله مورد بررسی تجربی و شبیه‌سازی قرار گرفته است. به علاوه اثر دما، فشار شکل‌دهی و سرعت سنبه بر روی توزیع ضخامت و نیروی شکل‌دهی، برای تولید قطعات استوانه‌ای سرتخت از جنس ورق آلومینیومی 5052 در حالت گرم هم‌دما مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه به مقایسه شکل‌دهی در سه حالت دمایی دمای محیط، شرایط گرم هم‌دما و گرم غیر هم‌دما (سنبه سرد) با استفاده از شبیه‌سازی پرداخته شد.

2- خواص مواد

ماده بکار رفته در این پژوهش مشابه جنس ورق استفاده شده در مرجع [14] بوده است که منحنی تنش کرنش حقیقی آن در شکل‌های 2 و 3 نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشخص است، با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش به دلیل پایین آمدن استحکام و جریان بهتر مواد، تنش سیلان کم و ازدیاد طول بیشینه افزایش می‌یابد.

3- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این پژوهش از نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی استفاده شده است. با توجه به متقارن بودن مجموعه قالب و فرآیند، از یک مدل متقارن محوری برای شبیه‌سازی فرآیند استفاده شد. ورق بصورت شکل‌پذیر¹ مدل‌سازی شد و از المان متقارن محوری چهارگره‌ای CAX4RT استفاده شده است که دارای درجه آزادی دما و جابجایی نیز می‌باشد. مدل سایر اجزای قالب به صورت صلب تحلیلی² در نظر گرفته شد. جدول 1 مشخصات هندسی قالب و گرده را نشان می‌دهد. جهت معرفی خواص ورق، داده‌های ارائه شده در شکل‌های 2 و 3 بصورت جدول تنش و کرنش به نرم‌افزار معرفی شد. در جدول 2 مشخصات

شکل‌دهی، بهبود دقت ابعادی و کیفیت سطح، یکنواخت‌تر شدن توزیع ضخامت در قطعه، کاهش برگشت فنی، ساده‌تر شدن مجموعه قالب و کاهش هزینه‌های آن از مزایای عمده فرآیند هیدروفرمینگ نسبت به کشش عمیق سنتی است [2-4]. فرآیند هیدروفرمینگ دارای انواع مختلفی می‌باشد که یکی از آن‌ها، روش کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی است. فشار شعاعی باعث جریان آسان‌تر ورق به داخل محفظه قالب و در نتیجه افزایش نسبت کشش و کاهش نیروی شکل‌دهی می‌شود [5].

آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم بدلیل برخورداری از استحکام بالا، نسبت استحکام به وزن خوب و مقاومت به خوردگی بالا، جایگزین خوبی برای فولاد در صنایع بخصوص خودروسازی به شمار می‌آید. عیب اصلی این آلیاژها چقرمگی کم و شکل‌پذیری پایین آن‌ها در دمای اتاق و هزینه بالای این مواد می‌باشد. برای رفع این مشکل و کاهش استحکام تسلیم ورق و نیز در پی آن کاهش نیروی شکل‌دهی، عملیات شکل‌دهی در دمای بالا انجام می‌شود و فرآیند جدیدی به نام هیدروفرمینگ گرم معرفی شد تا مشکلات موجود را برطرف کند. شکل 1 شماتیک از فرآیند هیدروفرمینگ گرم را نشان می‌دهد. گرچه تحقیقات مربوط به فرآیند هیدروفرمینگ گرم از سال 1997 آغاز شد ولی به دلیل دشواری‌های تکنیکی، پژوهش‌های گسترده‌ای در این زمینه انجام نشده است [6]. در زمینه هیدروفرمینگ گرم لوله تحقیقات محدودی در داخل کشور بعمل آمده است [7,8]. گروه و همکاران تاثیر استفاده از فرآیند کشش عمیق گرم و فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ را برای دو آلیاژ آلومینیوم (AIMg4.5Mn و AIMg0.4Si1.2) مورد بررسی قرار دادند. توضیحات دقیقی از نحوه تاثیر دمای قالب و نیز وجود سیال بر قابلیت شکل‌دهی ارائه شد و پارامترهای فرآیند بر اساس آن طرح‌ریزی گردید و نسبت کشش حدی بدست آمده از آزمایش به عنوان معیار مقایسه قابلیت فرآیند در نظر گرفته شد. مطابق نتایج، استفاده از عملیات گرم در هر دو فرآیند و برای هر دو آلیاژ، موجب افزایش نسبت کشش حدی گردید. علاوه بر آن، کشش عمیق هیدروفرمینگ در دو حالت سرد و گرم عمق بیشتری از قطعه را نسبت به حالت کشش عمیق گرم به وجود آورده است [9].

زاکی‌نسکی و همکاران نشان دادند که در فرآیندهای شکل‌دهی سنتی، شروع چروکیدگی با افزایش دما به تاخیر می‌افتد و از این رو، برای شکل‌دادن قطعه، نیاز به نیروی ورق‌گیر کمتری نسبت به حالت سرد است [10].

گریت کورز نشان داد که در فرآیند کشش عمیق با افزایش دما، نسبت کشش ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. وی مشاهده نمود که با استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ به دلیل افزایش اصطکاک بین ورق و سنبه بخاطر فشار سیال می‌توان در دمای کمتر به نسبت کشش بیشتری نسبت به کشش عمیق دست یافت [11].

چوی و همکاران در پژوهشی به مقایسه شکل‌دهی با استفاده از فرآیند‌های کشش عمیق سنتی و کشش عمیق هیدروفرمینگ پرداختند. آن‌ها به این نتایج دست یافتند که با افزایش دمای فلنج نسبت کشش حدی در هر دو فرآیند کشش عمیق سنتی و کشش عمیق هیدروفرمینگ افزایش و مقدار آن برای کشش عمیق هیدروفرمینگ بیشتر می‌باشد. در ادامه به بهینه کردن دمای اجزای مختلف سیستم در فرآیندهای مورد بررسی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سنبه برای افزایش استحکام قسمت‌هایی از ورق در تماس با آن باید در دمای سرد و ناحیه فلنج برای جریان بهتر ورق به داخل حفره قالب باید در دمای بالا قرار داشته باشد و نیز ناحیه شعاع ورودی قالب و سیال هیدرولیکی باید در سطح دمایی کم یا متوسط قرار داشته باشند [12].

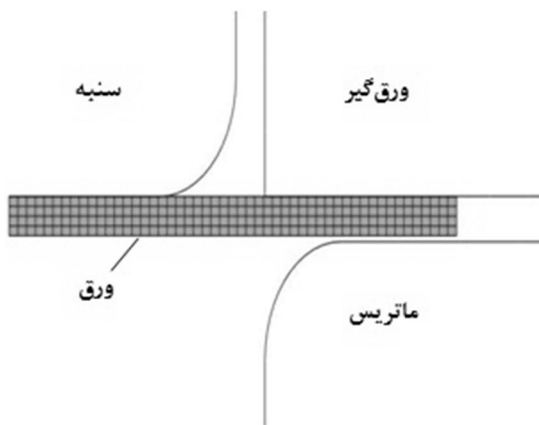
1- Deformable
2- Analitical Rigid

جدول 1 ابعاد هندسی مجموعه قالب و گرده

| مشخصه | مقدار |
|--------------------------------|-------|
| قطر سنبه (mm) | 36 |
| قطر گرده (mm) | 72 |
| ضخامت ورق (mm) | 2 |
| فاصله (لقی) ورق و ورق‌گیر (mm) | 0/25 |
| قطر داخلی ماتریس (mm) | 40/6 |
| شعاع گوشه سنبه و قالب (mm) | 6 |

جدول 2 مشخصات مکانیکی و خواص فیزیکی ورق آلیاژ آلومینیوم 5052 [14]

| مشخصه | مقدار |
|--|-------|
| استحکام تسلیم در دمای 200 درجه سانتیگراد (MPa) | 89/6 |
| چگالی (kg/m ³) | 2680 |
| مدول الاستیسیته (GPa) | 70/3 |
| ضریب پواسون | 0/33 |



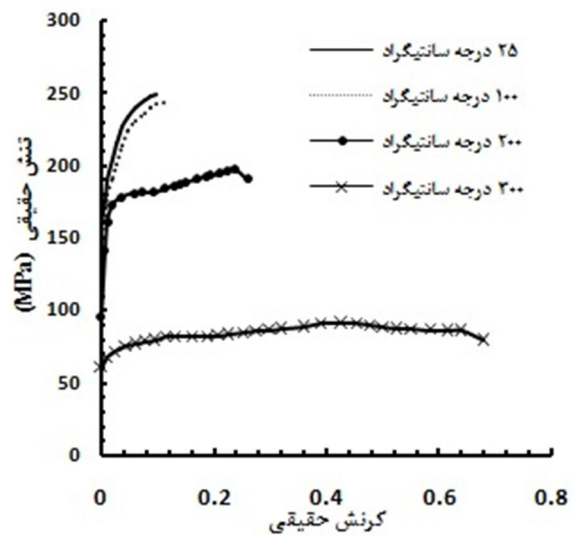
شکل 4 مدل فرآیند در نرم‌افزار اجزای محدود

در واحد بار⁵، یک باردهی به صورت فشار سیال تعریف شد که به سطح زیرین و نیز به سطح جانبی به دلیل ایجاد حالت فشار شعاعی اعمال گردید. سپس قیدهای حرکتی و دمایی تعریف شده‌اند. برای تحلیل فرآیند فرض شد که ورق برای مدت زمانی معینی بین ماتریس و ورق‌گیر قرار داشته تا به دمای مورد نظر برای شکل‌دهی که همان دمای ماتریس و ورق‌گیر بوده، برسد.

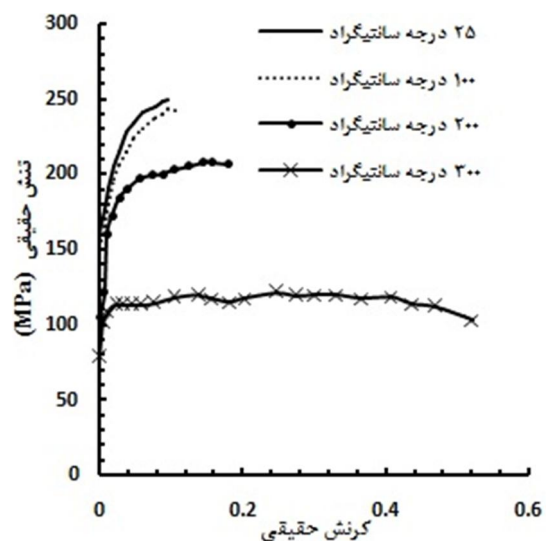
4- مراحل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها با یک دستگاه آزمایش اونیورسال 600 کیلو نیوتنی نشان داده شده در شکل 5، انجام گردید. این دستگاه به یک سیستم کنترل کننده متصل بوده که فرآیند را در حین انجام کنترل می‌کند و با استفاده از این سیستم منحنی نیروی سنبه بر حسب جابجایی آن قابل دریافت می‌باشد. تزریق فشار درون قالب برای انجام فرآیند توسط پمپ هیدرولیک و کنترل فشار در حین انجام فرآیند به وسیله شیر اطمینان و فشارسنج روی آن صورت می‌گیرد. در شکل 5 تصویر پمپ هیدرولیک نیز نشان داده شده است. برای کنترل فشار بیشینه محفظه قالب، از یک شیر کنترل فشار استفاده شده است. در واقع با تنظیم شیر روی مقداری مشخص، حداکثر فشار داخل

مکانیکی و خواص فیزیکی ورق آلومینیومی 5052 آمده است. در شکل 4 مدل مونتاژ شده فرآیند هیدروفورمینگ گرم مربوط به این پژوهش در نرم‌افزار شبیه‌سازی نشان داده شده است. در این پژوهش، انجام شبیه‌سازی فرآیند در یک گام¹، به صورت کوپل جابجایی-حرارتی² بوده، به صورت دینامیکی مدل شده نوع حل صریح³ بوده است. در ادامه شبیه‌سازی، در مدل برهم‌کنش⁴ شرایط تماسی بین سطوح مختلف تعریف می‌شود که با انجام چند شبیه‌سازی و مقایسه منحنی‌های توزیع ضخامت و نیروی سنبه بدست آمده با نتایج تجربی بهترین مقدار ضریب اصطکاک در سطح تماس سنبه و ورق 0/15 و برای تماس بین سایر اجزای قالب با ورق 0/06 در نظر گرفته شد. در اینجا با توجه به مرجع [15] ضریب اصطکاک ثابت در نظر گرفته شده است.

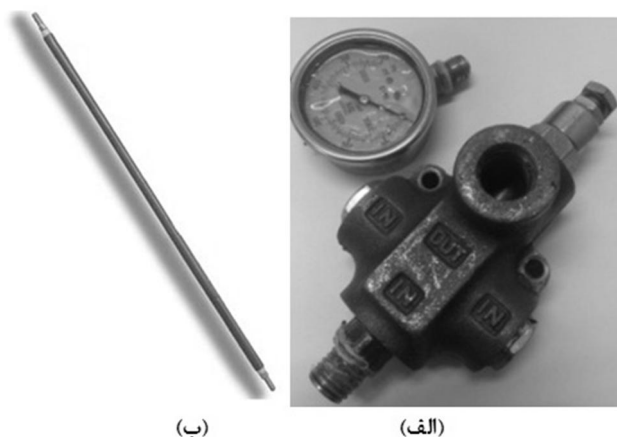


شکل 2 نمودار تنش-کرنش آلیاژ آلومینیوم 5052 در دماهای مختلف و در نرخ کرنش 0/0013 [14]

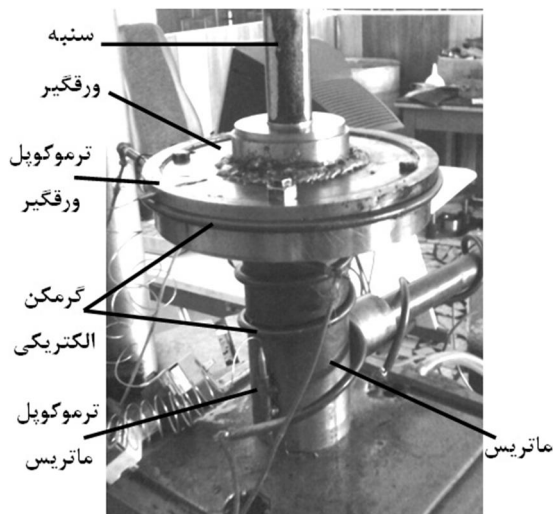


شکل 3 نمودار تنش-کرنش آلیاژ آلومینیوم 5052 در دماهای مختلف و نرخ کرنش 0/013 [14]

- 1- Step
- 2- Temp-disp
- 3- Explicit
- 4- Interaction



شکل 6 (الف) شیر اطمینان و فشارسنج (ب) گرمکن حرارتی



شکل 7 قالب استفاده شده در پژوهش

در ادامه برای بررسی اثر دمای شکل‌دهی بر روی توزیع ضخامت و نیروی سنبله، فرآیند هیدروفرمینگ گرم در دماهای 25، 100، 150، 200 و 250 درجه سانتیگراد و در مسیر فشار با فشار بیشینه 32 مگاپاسکال انجام شد. سومین پارامتر مورد مطالعه در این مقاله، بررسی اثر سرعت شکل‌دهی بر روی قابلیت شکل‌پذیری آلومینیوم 5052 می‌باشد. آزمایش‌های مربوط، در دمای 200 درجه سانتیگراد، فشار بیشینه 32 مگاپاسکال و در سرعت‌های شکل‌دهی (سرعت سنبله) 50، 150 و 200 میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. مسیر فشارهای مورد استفاده مربوط به تغییرات سرعت در شکل 9 نشان داده شده است که با توجه به شکل، در قسمت اولیه مسیر فشار برای سرعت‌های مختلف سنبله شیب منحنی متفاوت می‌باشد. به دلیل اینکه یکی از فاکتورهای خروجی مورد بررسی در این پژوهش توزیع ضخامت قطعه می‌باشد، برای تحلیل دقیق‌تر ضخامت، قطعه مورد نظر مطابق شکل 10 به سه ناحیه کف قطعه کار، شعاع گوشه سنبله و دیواره‌ی قطعه کار تقسیم‌بندی گردید.

5- نتایج و بحث

شکل 11 نمونه‌ای از قطعه شکل داده شده را نشان می‌دهد. شکل 12 منحنی توزیع ضخامت بر حسب فاصله از مرکز قطعه کار و شکل 13 منحنی نیروی سنبله بر حسب جابجایی، حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی مربوط به قطعه شکل داده شده در دمای 200 درجه سانتیگراد، سرعت

محفظه تعیین می‌شود. با رسیدن فشار محفظه به این فشار، شیر تخلیه باز شده و اضافه فشار تخلیه می‌شود. در شکل 6 - الف شیر اطمینان و فشارسنج نشان داده شده است. سیال مورد استفاده روغن انتقال حرارت (حرارتی) با گرانروی cst 100 است که قابلیت تحمل دما تا 300 درجه سانتیگراد را دارا می‌باشد.

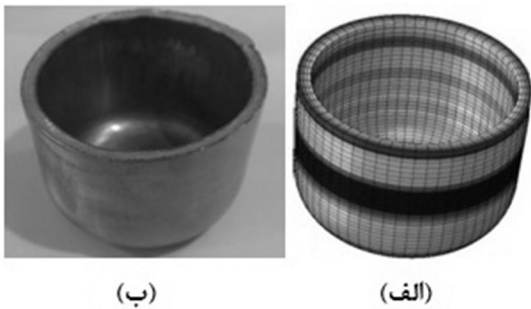
قالب استفاده شده از ماتریس، سنبله، ورق‌گیر و راهنما برای هدایت سنبله تشکیل شده است. از آنجایی که فرآیند در حالت گرم انجام می‌شود با جاسازی کردن گرمکن‌های الکتریکی در ماتریس و ورق‌گیر سیستم در دمای گرم موردنظر قرار می‌گیرد. در شکل 6-ب نمونه‌ای از گرمکن‌های الکتریکی و در شکل 7 قالب استفاده شده در آزمایش‌های تجربی مشاهده می‌شود. در این سیستم برای اندازه‌گیری دما، از دماسنج‌های جاسازی شده در قسمت میانی ماتریس و نیز در داخل ورق‌گیر استفاده شد.

برای تولید فنجان‌های سر تخت و انجام بررسی‌های مورد نظر، از گرده‌هایی به قطر 72 میلی‌متر از جنس آلیاژ آلومینیوم 5052 به ضخامت 2 میلی‌متر استفاده شده است. در ابتدا برای بررسی اثر فشار سیال روی فرآیند، بررسی‌ها در نسبت کشش 2 و در دمای 200 درجه سانتیگراد بصورت هم‌دما انجام گردید. مسیر فشارهای نشان داده شده در شکل 8 مورد استفاده قرار گرفت.

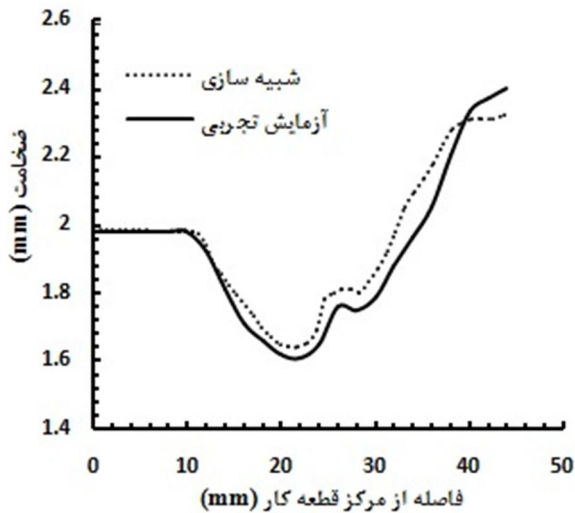
لازم به ذکر است که ورق‌گیر و راهنما (که وظیفه هدایت سنبله را بر عهده دارد) به هم جوش داده شده‌اند. برای هدایت دقیق سنبله به درون محفظه قالب، حالت عبوری سنبله از راهنما به صورت جذب و روان می‌باشد و از آنجایی که از ابتدای فرآیند گرم کردن سیستم، سنبله با عبور از راهنما روی ورق و درون سیستم قرار دارد تمام مجموعه در همان دمای مورد نظر شکل‌دهی قرار دارند. با توجه به شکل، برای بهبود بخشیدن به جریان فلز در حین فرآیند، ابتدا یک فشار اولیه 3 بار، پیش از شروع حرکت سنبله به سطح زیرین ورق اعمال گردید. اعمال این فشار اولیه باعث ایجاد حالت پیش‌بالج¹ می‌شود که باعث جریان بهتر ورق در حین شکل‌دهی می‌شود. همزمان با نفوذ سنبله به درون محفظه قالب، فشار سیال با نفوذ سنبله افزایش می‌یابد تا فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی فراهم شود. در ادامه و با رسیدن فشار سیال به مقدار بیشینه از پیش‌تنظیم شده، شیر کنترل فشار باز شده و فشار محفظه ثابت می‌ماند. در واقع این مسیر، مسیر فشار ثابت و حداکثر فشار اعمالی است. دلیل ثابت بودن فشار در این حالت تخلیه سیال اضافی از شیر کنترل فشار می‌باشد. این آزمایش‌ها، در سرعت سنبله 50 میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفته است.



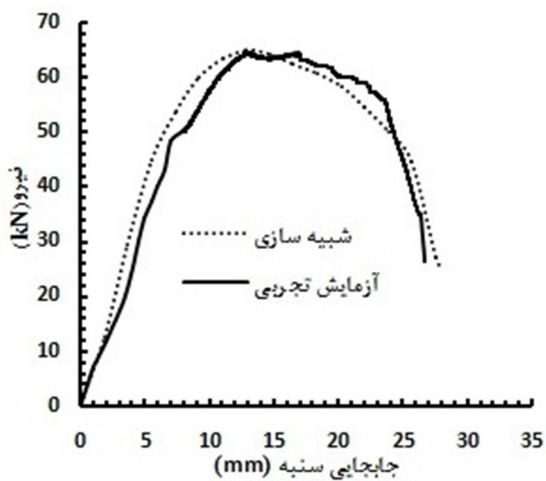
شکل 5 دستگاه آزمایش اونیورسال و پمپ هیدرولیک اعمال فشار



شکل 11 قطعه شکل داده شده با الف - شبیه سازی ب - آزمایش تجربی

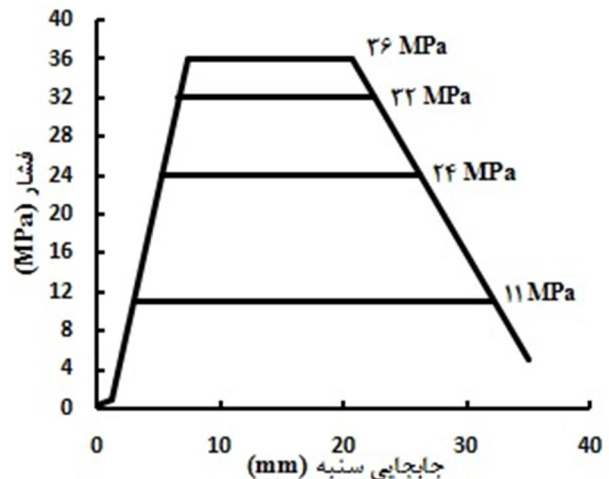


شکل 12 نمودار توزیع ضخامت بر حسب فاصله از مرکز قطعه کار

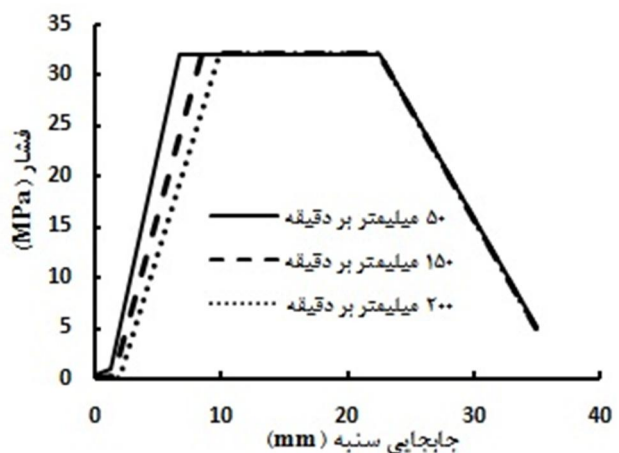


شکل 13 نمودار نیروی سنبه بر حسب جابجایی آن

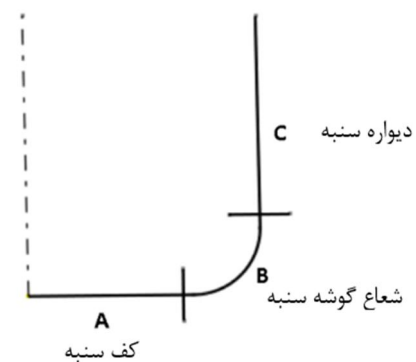
با توجه به روند تغییرات نیروی سنبه در شکل 13، نیروی سنبه ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. دلیل این امر را می توان اینگونه بیان نمود که پس از تماس اولیه سنبه با ورق، جریان ماده بر روی شعاع های سنبه و قالب آغاز می شود. پس از شکل دهی ناحیه A و ادامه ی فرآیند، افزایش کارسختی، مقاومت به تغییر شکل را افزایش می دهد. از طرفی کاهش شعاع و محیط ورق در ناحیه ی فلنچ نیز نیروی شکل دهی را کاهش می دهد. در ابتدا نرخ افزایش کار سختی از نرخ کاهش نیرو بر اثر کاهش سطح تماس ورق با ورق گیر بیشتر می باشد. در نتیجه نیرو افزایش می یابد. با افزایش عمق کشش، آهنگ کاهش نیرو بر اثر کاهش سطح تماس ورق در ناحیه ورق گیر افزایش



شکل 8 نمودار مسیر فشار در فشارهای بیشینه مختلف



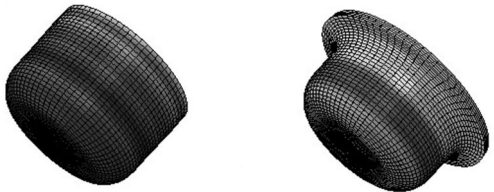
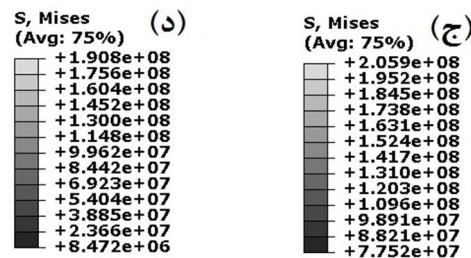
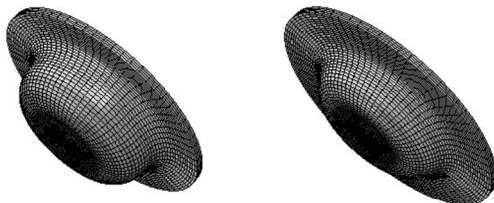
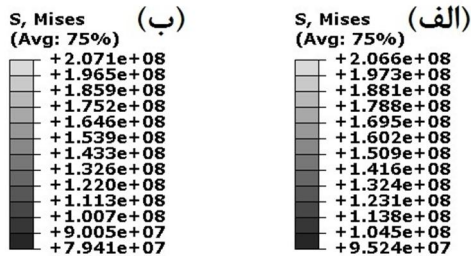
شکل 9 مسیر فشار در سرعت های شکل دهی مختلف



شکل 10 ناحیه بندی قطعه کار برای بررسی توزیع ضخامت

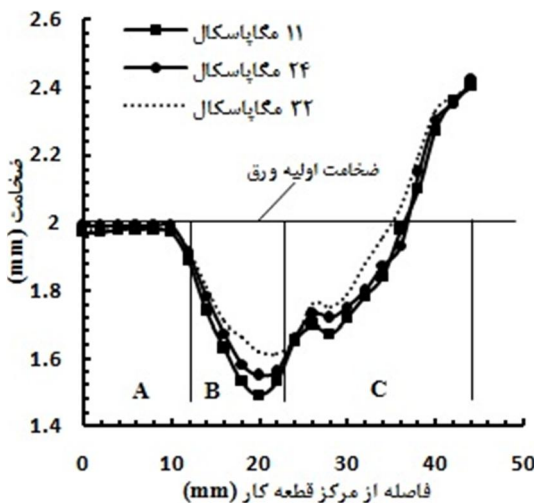
شکل دهی 50 میلیمتر بر دقیقه و فشار بیشینه 32 مگاپاسکال را در فرآیند هیدروفرمینگ گرم با فشار شعاعی نشان می دهد. همانگونه که در این دو شکل مشاهده می شود انطباق قابل قبولی بین نتایج وجود دارد و اختلاف جزئی که در نمودار در دو حالت وجود دارد ناشی از شرایط محیطی، کنترل فرآیند و اندازه گیری ضخامت می باشد. نتایج حاصله دلالت بر صحت شبیه سازی دارد. حداکثر نازک شدگی در دو منحنی کمتر از 3/5 درصد اختلاف داشته و نیروی سنبه بیشینه تقریباً مساوی می باشد.

مجموع نیروی اصطکاک بین ورق و دیگر اجزا، تاثیر نرخ کرنش، اعمال فشار سیال در جهت مخالف حرکت سنبه و کارسختی می‌باشد. با توجه به اینکه سطح تماس مورد نظر سطح تماس عمود بر حرکت سنبه باید در نظر گرفته شود و در فشار بیشینه تقریباً این مقدار ثابت است، در نتیجه طبق رابطه $F=PA$ نیروی بیشینه سنبه با افزایش فشار تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد.



شکل 14 نمونه‌های شبیه‌سازی شده در ارتفاع:

الف- 8 میلیمتر ب- 14 میلیمتر ج- 20 میلیمتر د- ارتفاع نهایی



شکل 15 نمودار توزیع ضخامت تجربی در فشارهای سیال مختلف، دمای 200 درجه سانتیگراد و سرعت سنبه 50 میلیمتر بر دقیقه

می‌یابد و در کورس مشخص، آهنگ افزایش نیرو حاصل از کار سختی با آهنگ کاهش آن بر اثر کاهش سطح تماس برابر شده و نیرو به مقدار حداکثر می‌رسد. از آن پس، بخاطر پیشی گرفتن آهنگ کاهش نیرو بر اثر کاهش سطح تماس ورق با ورقگیر از آهنگ افزایش آن بر اثر کار سختی، نیرو کاهش می‌یابد [16]. در شکل 14 تغییرات تنش در ارتفاع‌های مختلف شکل‌گرفته شده در دمای 200 درجه سانتیگراد، فشار 32 مگاپاسکال و سرعت 50 میلیمتر بر دقیقه نشان داده شده است. با توجه به این شکل و مشاهده تنش بیشینه در هر کدام از ارتفاع‌ها ملاحظه می‌شود که تنش بیشینه ایجاد شده در قطعه (ناحیه بالایی دیواره تا انتهای فلنچ) تا جابجایی سنبه خاصی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در نتیجه در حین شکل‌دهی نیروی سنبه نیز تا یک جابجایی سنبه خاصی روند افزایشی داشته و در ادامه کاهش می‌یابد.

1-5- بررسی اثر فشار سیال

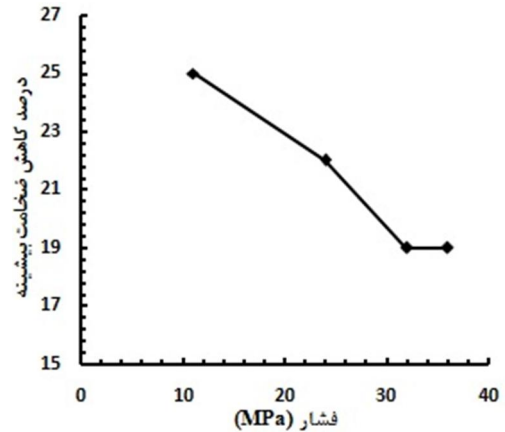
مسیر فشار و فشارهای نهایی نقش مهمی در ایجاد پارگی و توزیع ضخامت قطعات تولید شده ایفا می‌کند. از این رو، جهت بررسی اثر فشار بر روی قابلیت شکل‌پذیری، آزمایش‌های تجربی در فشارهای بیشینه‌ی 11، 24، 32 و 36 مگاپاسکال انجام شد. شکل 15 نمودارهای توزیع ضخامت تجربی بر حسب فاصله از مرکز قطعه‌کار را در فشارهای شکل‌دهی مختلف نشان می‌دهد. همانطوری که در شکل مشاهده می‌شود مقدار کاهش ضخامت در ناحیه کف قطعه (A) بسیار ناچیز می‌باشد. در این ناحیه کرنش‌های کششی به قطعه اعمال می‌شود و از طرفی چون ورق در تماس با سنبه می‌باشد به خاطر وجود نیروی اصطکاک، ورق روی سنبه می‌لغزد و کشش داخل ورق کاهش می‌یابد. در کار گرم بخاطر افزایش ضریب اصطکاک مقدار کاهش ضخامت از کشش در کار سرد کمتر می‌باشد.

با توجه به شکل، در شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای بحرانی‌ترین ناحیه بدلیل بیشترین تغییر ضخامت، ناحیه شعاع گوشه سنبه (B) می‌باشد. در حین کشش، ماده ناحیه B تحت خمش و کشش قرار می‌گیرد که کرنش‌های نسبتاً بزرگی را در این ناحیه در پی خواهد داشت. از این رو، بیشترین کاهش ضخامت در این ناحیه اتفاق می‌افتد. ماده واقع در ناحیه C از انتهای شعاع گوشه‌ی پایینی نمونه آغاز شده که دیواره و فلنچ را شکل می‌دهد. انتهای فلنچ (بدلیل وجود تنش فشاری) در جهت شعاعی به طرف داخل کشیده می‌شود که تاثیر این کاهش در شعاع و محیط ورق موجب افزایش ضخامت ورق می‌شود.

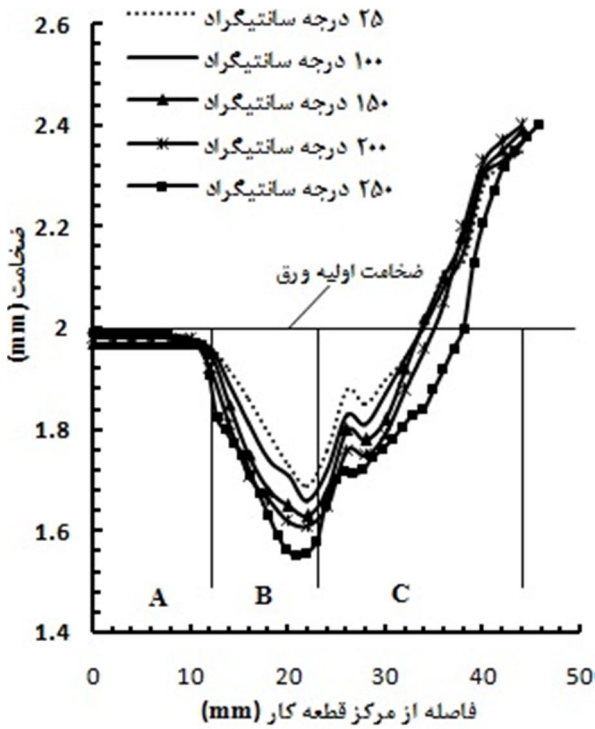
شکل 16 منحنی تغییرات درصد کاهش ضخامت بیشینه را در ناحیه شعاع گوشه سنبه بر حسب فشار بیشینه نشان می‌دهد. با توجه به شکل بیشترین درصد کاهش ضخامت مربوط به فشار بیشینه 11 مگاپاسکال می‌باشد. با افزایش فشار تا حدود 32 مگاپاسکال کاهش ضخامت با شیب تندی کم می‌شود ولی از فشار بیشینه حدود 32 مگاپاسکال تقریباً بصورت افقی در می‌آید. بنابراین با افزایش فشار از 32 به 36 مگاپاسکال تغییرات خاص و چشمگیری در ضخامت قطعه صورت نگرفت. به همین دلیل در نمودار 15 داده‌های مربوط به فشار 36 مگاپاسکال ذکر نشده است. همانطوری که بیان شد افزایش فشار موجب افزایش تماس و اصطکاک بین ورق و سنبه شده و در نتیجه باعث می‌شود حداکثر کشش و نیز حداکثر نازک‌شدگی در فاصله دورتری از مرکز قطعه‌کار صورت گیرد.

با بررسی نیروی شکل‌دهی در فشارهای مختلف، نمودار شکل 17 حاصل گردیده است. با توجه به این نمودار با افزایش فشار، نیروی بیشینه‌ی سنبه برای شکل‌دهی زیاد می‌شود. نیروی لازم برای شکل‌دهی در واقع

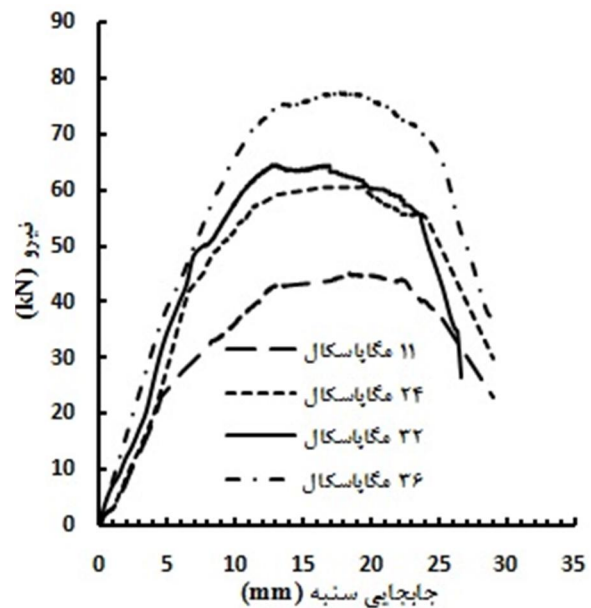
می‌باشد و برای دمای 250 درجه سانتیگراد در این ناحیه کاهش ضخامت مشاهده نمی‌شود. اما در ناحیه شعاع گوشه سنبه (B) که بحرانی‌ترین ناحیه می‌باشد، با افزایش دما، نازک‌شدگی افزایش یافته است. دلیل این را می‌توان نرم شدن ورق و نیز افزایش قابلیت کشش آن در اثر بالا رفتن دما دانست. این نتیجه در شکل 20 نیز نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، در دمای 25 درجه سانتیگراد حداکثر کاهش ضخامت 15/5 درصد و بیشترین کاهش ضخامت مربوط به دمای 250 درجه سانتیگراد به مقدار 22/5 درصد می‌باشد.



شکل 16 نمودار درصد کاهش ضخامت بیشینه در ناحیه شعاع گوشه سنبه در فشار-های سیال مختلف



شکل 18 نمودار توزیع ضخامت در دماهای مختلف حاصل از آزمایش‌های تجربی، سرعت سنبه 50 میلی‌متر بر دقیقه و فشار سیال 32 مگاپاسکال

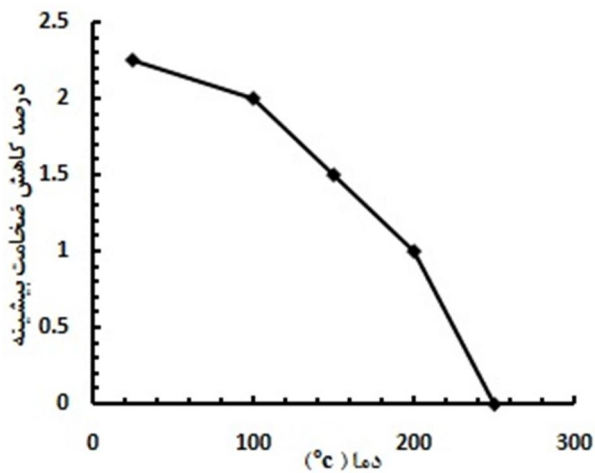


شکل 17 نمودار نیروی سنبه بر حسب جابجایی در فشارهای سیال مختلف

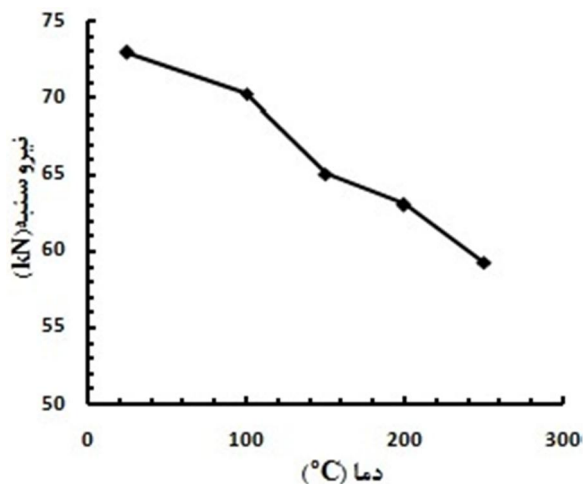
با توجه به اینکه با بالا رفتن فشار بیشینه سیال، از یک سو نازک‌شدگی در نواحی بحرانی کاهش می‌یابد و از سوی دیگر باعث افزایش نیروی سنبه می‌شود، از این رو، تعیین بهترین مسیر فشار مسئله مهمی در شکل‌دهی مطلوب می‌باشد. با توجه به نتایج مسیر فشار با فشار بیشینه 32 مگاپاسکال بهترین مسیر فشار برای شکل‌دهی این قطعات می‌باشد. افزایش فشار بیشتر از این مقدار تاثیری در ضخامت در نقاط بحرانی نداشته ولی نیروی سنبه را افزایش می‌دهد.

5-2- بررسی اثر دمای شکل‌دهی

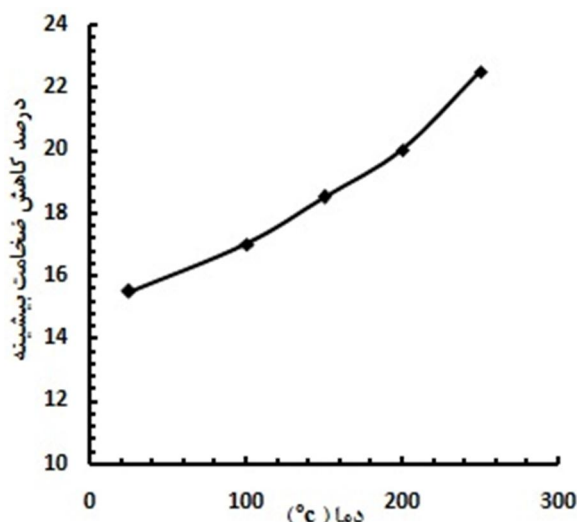
شکل 18 نمودار توزیع ضخامت بر حسب فاصله از مرکز قطعه‌کار را در دما-های شکل‌دهی مختلف نشان می‌دهد. با تغییر دمای شکل‌دهی، در ناحیه کف قطعه‌کار (A) تغییرات چشمگیری حاصل نشده است بلکه بصورت جزئی، با افزایش دما نازک‌شدگی به دلیل افزایش چسبندگی بین ورق و سنبه و کاهش کشیدگی ورق حاصل از این افزایش چسبندگی، کم شده است. شکل 19 نمودار درصد نازک‌شدگی بیشینه در دماهای مختلف را در ناحیه کف نشان می‌دهد. درصد نازک‌شدگی بیشینه در ناحیه کف قطعه‌کار برای دماهای 25، 100، 150 و 200 درجه سانتیگراد به ترتیب 2/25، 2، 1/5 و 1 درصد



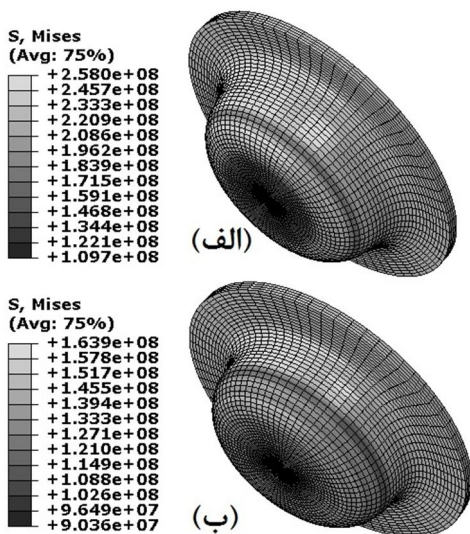
شکل 19 نمودار تجربی درصد کاهش ضخامت بیشینه در ناحیه کف قطعه‌کار (A) در دماهای مختلف



شکل 22 نمودار نیروی بیشینه سنجه در دماهای مختلف شکل‌دهی

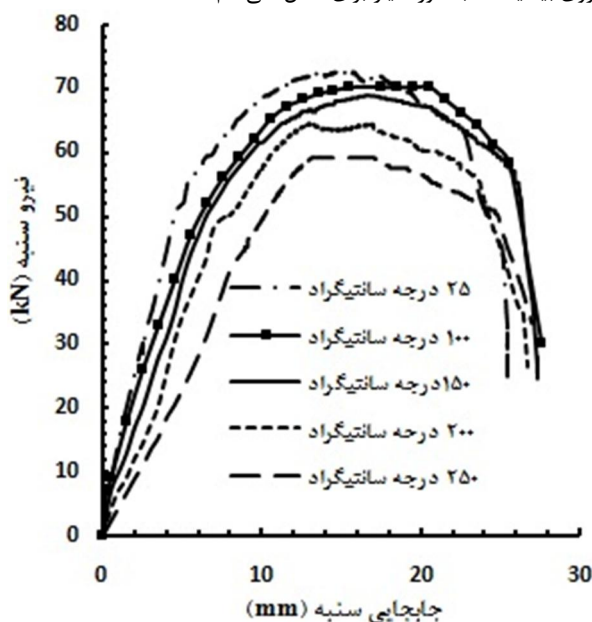


شکل 20 نمودار تجربی درصد کاهش ضخامت بیشینه در ناحیه شعاع گوشه سنجه در دماهای مختلف



شکل 23 نتیجه شبیه‌سازی تنش بیشینه در دماهای مختلف، الف- دمای محیط ب- 250 درجه سانتیگراد

شکل 21 منحنی نیروی سنجه بر حسب جابجایی و شکل 22 نیروی بیشینه را در دماهای شکل‌دهی مورد بررسی نمایش می‌دهد. با توجه به این نمودارها، با افزایش دمای شکل‌دهی، به دلیل کم شدن استحکام ورق و کاهش تنش سیلان نیروی بیشینه سنجه کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث بهبود قابلیت شکل‌دهی آلیاژ آلومینیوم می‌شود. نکته دیگری که در این نمودار مشاهده می‌شود کاهش بیشتر نیرو در دماهای بالاتر است. با توجه به نمودار تنش کرنش که در بخش شبیه‌سازی و در شکل‌های 2 و 3 نشان داده شد، برای آلیاژ آلومینیوم 5052 تاثیر تغییرات دمایی بر روی تنش، در دماهای بالا بیشتر می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر دلیل کاهش نیرو با افزایش دما، تنش بیشینه ایجاد شده در حین شکل‌دهی در ورق با شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. شکل 23 نمونه‌های شبیه‌سازی شده در دمای محیط و 250 درجه سانتیگراد را در حالت ایجاد تنش بیشینه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل با افزایش دما تنش بیشینه در ورق کاهش یافته و در پی آن نیروی بیشینه سنجه مورد نیاز برای شکل‌دهی کم شده است.

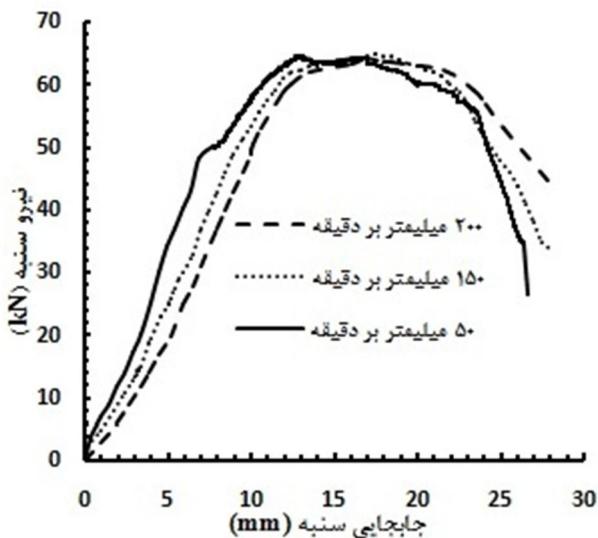


شکل 21 نمودار نیروی سنجه در دماهای مختلف شکل‌دهی

3-5- بررسی اثر سرعت سنجه

با انجام آزمایش‌ها در سرعت‌های شکل‌دهی مختلف، منحنی شکل 24 برای توزیع ضخامت در قطعه‌ی شکل گرفته شده بدست آمد. همانطور که مشاهده می‌شود با زیاد شدن سرعت سنجه حداکثر نازک‌شدگی کمتر شده و توزیع ضخامت بهبود می‌یابد. در واقع افزایش سرعت در دماهای بالا باعث افزایش تاثیر نرخ کرنش و در پی آن زیاد شدن استحکام ماده می‌شود. افزایش استحکام در ورق مانع از کشیدگی زیاد آن شده که این امر سبب کاهش درصد نازک‌شدگی بیشینه می‌شود. در شکل 25 درصد نازک‌شدگی بیشینه در ناحیه شعاع گوشه سنجه در قطعه‌کار نشان داده شده است. با توجه به شکل با افزایش سرعت شکل‌دهی درصد نازک‌شدگی بیشینه کاهش می‌یابد.

نتیجه دیگر منحنی نیروی سنجه مطابق با شکل 26 می‌باشد. مشاهده می‌شود که نیروی بیشینه تغییر چشمگیری نداشته است. با بررسی مقدار تنش بیشینه در ورق حین شکل‌دهی با استفاده از شبیه‌سازی در سرعت‌های مختلف مشاهده شد که مقدار تنش بیشینه ثابت بوده است. در نمودار شکل 24 مشاهده می‌شود که در سرعت‌های پایین ماده به کرنش‌های بیشتری می‌رسد و در نتیجه تنش بیشینه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش



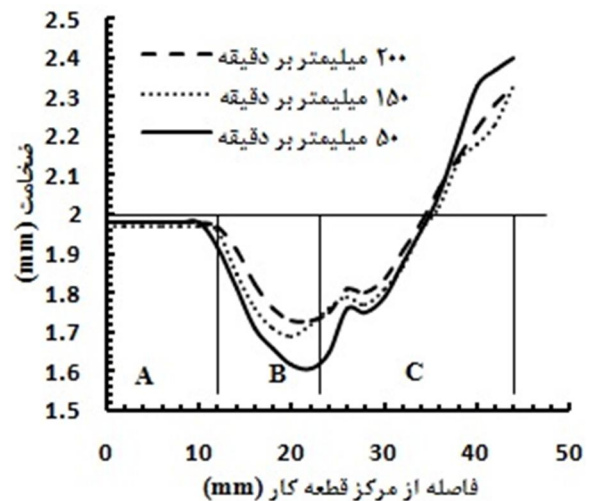
شکل 26 نمودار نیروی سنبه بر حسب جابجایی آن در سرعت‌های سنبه مختلف

5-4- مقایسه شکل‌دهی در سه حالت دمایی محیط، گرم هم‌دما و گرم غیر هم‌دما

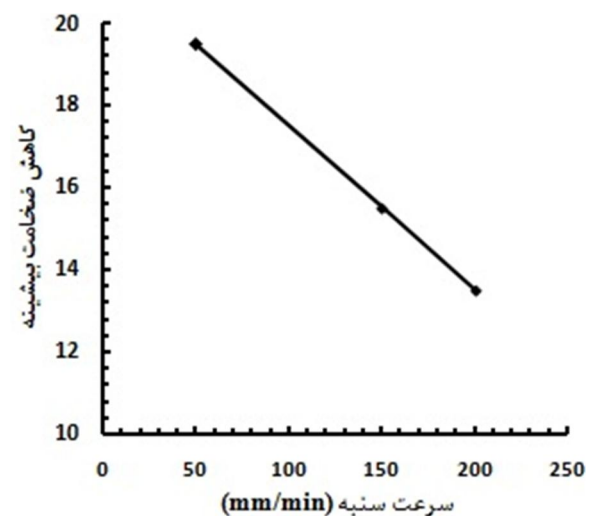
یکی از نتایجی که در شکل‌دهی در شرایط دمایی گرم هم‌دما بدست آمد افزایش نازک‌شدگی با افزایش دمای شکل‌دهی می‌باشد. یکی از روش‌ها شکل‌دهی گرم، حالت غیر هم‌دما می‌باشد که در آن دمای سنبه محیط بوده و دیگر اجزا در دمای بالا قرار دارند. در این بخش به بررسی و مقایسه منحنی‌های توزیع ضخامت و نیروی سنبه مربوط به شکل‌دهی در سه حالت دمای محیط، گرم هم‌دما و گرم غیر هم‌دما پرداخته شد. بررسی‌ها در دو حالت گرم هم‌دما و غیر هم‌دما در دمای 250 درجه سانتیگراد انجام شده است. با مطالعه انجام شده منحنی‌های شکل 27 برای توزیع ضخامت بدست آمده است. مشاهده می‌شود که استفاده از سنبه سرد باعث کاهش نازک‌شدگی بیشینه نسبت به حالت گرم هم‌دما شده است. در واقع افزایش دما در ورق باعث کم شدن استحکام ورق و در نتیجه افزایش کشیدگی آن شده است. استفاده از سنبه سرد سبب انتقال حرارت زیاد بین ناحیه کف و ناحیه شعاع گوشه سنبه با سنبه سرد می‌شود. نتیجه‌ی این انتقال حرارت این می‌باشد که فلنج و دیواره در حالت گرم قرار داشته و بحرانی‌ترین ناحیه (شعاع گوشه سنبه) در حالت سرد قرار دارد و کشیدگی در این قسمت کم شده و در پی آن نازک‌شدگی بیشینه کاهش می‌یابد.

با بررسی‌های انجام شده نمودار شکل 28 برای نیروی سنبه مورد نیاز برای شکل‌دهی حاصل شد. مشاهده می‌شود که بیشترین نیروی سنبه مربوط به دمای محیط می‌باشد و بعد از آن بیشترین نیروی مورد نیاز مربوط به حالت گرم غیر هم‌دما می‌باشد. نیروی سنبه بیشینه برای شکل‌دهی در دمای محیط، شرایط دمایی گرم غیر هم‌دما و گرم هم‌دما به ترتیب 72، 64 و 58 کیلو نیوتن بوده است. در حالت گرم هم‌دما تمام نواحی گرم می‌باشند ولی در حالت غیر هم‌دما ناحیه فلنج و دیواره گرم می‌باشند در نتیجه حالت گرم هم‌دما به نیروی سنبه کمتری نیاز دارد. با بررسی تنش بیشینه ایجاد شده در ورق در حین شکل‌دهی مشاهده شد که تنش بیشینه در دمای محیط بیشتر از حالت گرم غیر هم‌دما و در حالت گرم غیر هم‌دما نیز کمتر از شرایط دمایی گرم هم‌دما می‌باشد. در نتیجه، نیروی سنبه بیشینه برای شکل‌دهی در دمای محیط بیشتر می‌باشد.

سرعت، نرخ کرنش و در پی آن تنش بیشینه افزایش می‌یابد. این دو عامل سبب یکسان بودن تنش بیشینه می‌شود. این ثابت بودن تنش بیشینه عاملی برای ثابت بودن نیروی سنبه بیشینه می‌باشد. همانگونه که بیان شد دو عامل از عوامل تاثیرگذار روی نیروی سنبه، تاثیر نرخ کرنش و فشار سیال می‌باشد. در دماهای بالا افزایش سرعت، افزایش نرخ کرنش را سبب می‌شود که افزایش نرخ کرنش منجر به افزایش در مقاومت و سختی ماده شده که نیاز به نیروهای سنبه بالاتری برای شکل‌دهی می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به منحنی مسیر فشار در سرعت‌های مختلف که در شکل 9 نشان داده شده است تا رسیدن به فشار بیشینه در کورس یکسان، با کم شدن سرعت سنبه فشار سیال نیز کم می‌شود که کاهش فشار خود عاملی برای کاهش نیروی سنبه می‌باشد. اما زمانی که فشار سیال به فشار بیشینه می‌رسد (که در سرعت‌های بالاتر زودتر می‌رسد)، با توجه به شرایط تقریباً یکسان، نیروی بیشینه ثابت می‌ماند. قابل ذکر است که با بررسی تنش با شبیه‌سازی در کورس‌های یکسان قبل از رسیدن به جابجایی سنبه مربوط به نیروی بیشینه، تنش ایجاد شده برای سرعت سنبه بالاتر، کمتر بوده و این نیز دلیلی برای نیروی سنبه کمتر برای سرعت‌های بالاتر قبل از رسیدن به نیروی بیشینه می‌باشد.



شکل 24 نمودار توزیع ضخامت در سرعت‌های سنبه مختلف

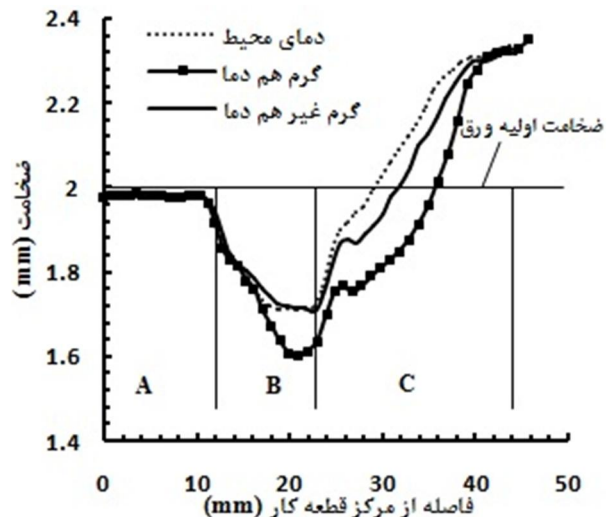


شکل 25 منحنی درصد کاهش ضخامت در ناحیه (B) در سرعت‌های سنبه مختلف

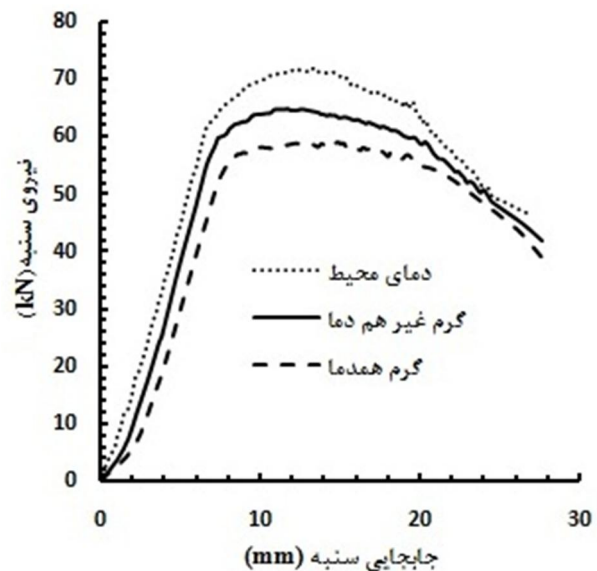
- با افزایش دما نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی ورق به دلیل کم شدن استحکام آن و در نتیجه کاهش تنش سیلان، کاهش می‌یابد. از سوی دیگر این افزایش دما و در پی آن کاهش استحکام باعث ازدیاد کشش و زیاد شدن حداکثر نازک‌شدگی می‌شود.
- با بررسی تاثیر سرعت سنبه روی قابلیت شکل‌پذیری ورق آلومینیومی 5052 این نتیجه حاصل شد که با تغییر سرعت سنبه نیروی بیشینه سنبه تغییر نکرده است و نیز هرچه سرعت سنبه زیاد شود، حداکثر نازک‌شدگی در قطعه کاهش می‌یابد.
- با مقایسه شکل‌دهی در دمای محیط، حالت گرم هم‌دما و گرم غیرهم‌دما این نتایج حاصل شد که کاهش ضخامت بیشینه در شرایط دمایی گرم غیرهم‌دما و دمای محیط کمتر از شرایط دمایی گرم هم‌دما بوده ولی نیروی سنبه مورد نیاز در فرآیند گرم هم‌دما کمتر می‌باشد.

7- مراجع

- [1] A. Kandil, An experimental study of hydroforming deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 134, pp. 70-80, 2003.
- [2] S. H. Zhang, K. B. Nielsen, J. Dankert, D. C. Kang, L. H. Lang, Finite Element Analysis of the Hydromechanical Deep Drawing Process of Tapered Rectangular Boxes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 102, pp. 1-8, 2000.
- [3] H. J. Becker, G. Benschmann, Further Development in Hydromechanical Deep Drawing, Developments in the Drawing of Metals, *Metal Society of London*, pp. 272-279, 1983.
- [4] K. Dachang, C. Yu, X. Yongchao, Hydromechanical Deep Drawing of Superalloy Cups, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, pp. 243-246, 2005.
- [5] L. Lang, J. Dankert, K. B. Nielsen, Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure: Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148, pp. 119-131, 2004.
- [6] K. Nakamura, Warm deep drawability with hydraulic counter pressure of 1050 Al sheets, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 47, pp. 323-328, 1997.
- [7] S. M. H. Seyedkashi, H. moslemi Naeini, G. H. Liaghat, M. Mosavi Mashadi, Y. H. Moon, numerical and experimental study on the effects of expansion ratio, corner fillets and strain rate in warm hydroforming of aluminum tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 122-131, 2012. (In Persian)
- [8] H. moslemi Naeini, G. H. Liaghat, S. J. Hashemi ghiri, S. M. Seyedkashi, F. Rahmani, numerical study of Thickness Distribution In Warm Aluminium Tube Hydroforming proces, *In The 2th Iranian conference On Manufacturing Engineering*, Najaf Abad, Iran, 2010. (In Persian)
- [9] P. Groche, R. Huber, J. Doerr, and D. Schmoedel, Hydromechanical deep-drawing of aluminium-alloys at elevated temperatures, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 51, pp. 215-218, 2002.
- [10] A. M. Szacinski, P. F. Thomson, Wrinkling behaviour of aluminium sheet during forming at elevated temperature, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 7, pp. 37-41, 1991.
- [11] G. Kurz, Heated hydro-mechanical deep drawing of magnesium sheet metal, *Magnesium Technology Symp, TMS Annual Meeting*, pp. 67-71, 2004.
- [12] H. Choi, M. Koc, J. Ni, A study on warm hydroforming of Al and Mg sheet materials: mechanism and proper temperature conditions, *Journal of Manufacturing Technology*, Vol. 130, No. 4, pp. 14 pages (doi:10.1115/1.2951945), 2008.
- [13] Q. F. Chang, D. Y. Li, Y. H. Peng, X. Q. Zeng, Experimental and numerical study of warm deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheet, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 3, pp. 436-443, 2007.
- [14] S. Mahabunphachai, M. Koc, Investigations on forming of aluminium 5052 and 6061 sheet alloys at warm temperatures, *Journal of material and design*, Vol. 31, pp. 2422-2434, 2010.
- [15] A. Yadav, *Process analysis and design in stamping and sheethydroforming*, PhD Thesis, University of Ohio, Ohio, Columbus, 2008.
- [16] W. F. Hosford, R. M. Caddell, *Metal forming: mechanics and metallurgy*, Cambridge: Cambridge University Press, 2011.



شکل 27 نتایج شبیه‌سازی توزیع ضخامت در سه حالت دمای محیط، گرم هم‌دما و گرم غیر هم‌دما



شکل 28 نتایج شبیه‌سازی در سه حالت دمایی دمای محیط، غیرهم‌دما و هم‌دما

6- نتیجه‌گیری

- در این پژوهش شکل‌دهی فنجان‌های استوانه‌ای با پیشانی تخت با استفاده از روش کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی در حالت گرم هم‌دما به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود با نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا فرآیند با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس تحلیل شد. در ادامه با استفاده از آزمایش‌های تجربی، صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی تایید گردید. با بررسی‌های انجام شده نتایج زیر حاصل شد:
- فشار سیال روی قابلیت شکل‌پذیری ورق تاثیرگذار می‌باشد. با بالا رفتن فشار سیال تا مقداری خاص، حداکثر نازک‌شدگی کاهش و نیروی بیشینه سنبه افزایش می‌یابد. افزایش فشار به بیش از یک مقدار معین، تاثیری در کاهش ضخامت در نقطه بحرانی ندارد ولی نیروی شکل‌دهی را افزایش می‌دهد.